

**Заворин Александр Сергеевич,**  
д-р техн. наук, зав. кафедрой  
парогенераторостроения и  
парогенераторных установок  
Энергетического института ТПУ.  
E-mail: [zavorin@tpu.ru](mailto:zavorin@tpu.ru)

Область научных интересов:  
энергетические технологии  
топливосжигания,  
теплофизические процессы в  
трактах котельных установок,  
диагностика и надежность  
работы энергетического  
оборудования.

УДК 621.182.002(571.16) (092)

**ФАКТОР МИНЕРАЛЬНОЙ ЧАСТИ  
В ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ  
НИЗКОСОРТНЫХ УГЛЕЙ:  
РЕТРОСПЕКТИВА ОПЫТА  
КОНСТРУИРОВАНИЯ  
И ЭКСПЛУАТАЦИИ КОТЛОВ**

А.С. Заворин

Томский политехнический университет  
E-mail: [zavorin@tpu.ru](mailto:zavorin@tpu.ru)

Приводится анализ опыта освоения для энергетического использования углей Канско-Ачинского бурогоугольного бассейна. Показаны затруднения в эксплуатации котлов, обусловленные спецификой минеральной составляющей углей, и эволюция конструктивных решений, инициированная необходимостью преодоления этой проблемы.

**Ключевые слова:**

Канско-ачинские угли, минеральная часть, золовые отложения, топочная камера, аэродинамика факела.

**Key words:**

Kansk-Achinsk coal, mineral component, ash sediments, combustion chamber, the aerodynamics of the flare.

Энергетическая стратегия России на период до 2020 г. отводит Канско-Ачинскому бассейну (КАБ) наряду с Кузбассом статус федерального значения в обеспечении энергетической безопасности и социально-экономического развития страны и ее регионов [1]. При всех сценариях реформирования и модернизации топливно-энергетического комплекса роль КАБ будет возрастать. Благодаря созданному ранее мощному заделу в развитие угольных разрезов сохраняется важное для современных условий и ближайшей перспективы преимущество использования канско-ачинских углей (КАУ) – самые низкие эксплуатационные затраты на добычу и возможность поставки угля стабильного качества в достаточных объемах.

Главным отличием состава золы КАУ от многих других бурых углей России является очень высокое содержание основных оксидов, прежде всего СаО, которое может достигать более 60 % в углях с наименьшей зольностью. Для состава золы характерной особенностью является также его зависимость от величины зольности угля, выражающаяся в убывании содержания основных и возрастании кислотных оксидов по мере увеличения зольности. Такая закономерность изменения состава объясняется принадлежностью основных и кислотных оксидов золы к разным по происхождению минералогическим составляющим, из которых складывается золообразующая часть топлива.

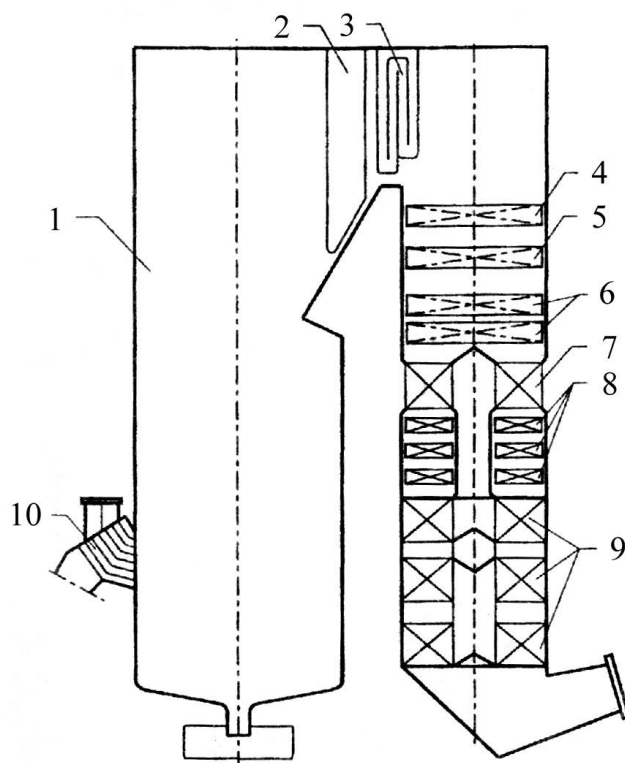
В соответствии с такими особенностями состава золы изменяются и характеристики ее плавкости: от чрезвычайно тугоплавкой до легкоплавкой. Это объясняется тем, что при изменении соотношения основных и кислотных компонентов во всем встречающемся диапазоне зольности одни и те же оксиды могут определять тугоплавкость золы (при высоком содержании) или играть роль «плавня».

Своеобразие состава и свойств золы проявились в серьезнейших затруднениях в практике использования КАУ в энергетике, прежде всего в шлаковании, а также интенсивно прогрессирующих и трудноудаляемых загрязнениях тепловоспринимающих поверхностей

паровых котлов. Инициированная этим эволюция котельно-топочного оборудования тепловых электростанций (ТЭС) проходила в противоречиях, которые в целом объясняются изначальным отставанием развития научного обеспечения. Сформировавшаяся в связи с этим потребность в целенаправленном изучении свойств минеральной части (МЧ) КАУ, несмотря на несомненные успехи, в отдельных направлениях не исчерпана до сих пор.

Неоднозначность проявлений термофизических свойств МЧ как следствие ее сложного состава сказывается на надежной работе топливосжигающих установок. Это в полной мере обозначилось с самого начального периода использования КАУ на тепловых электростанциях. Первые энергетические котлы, введенные в эксплуатацию для сжигания КАУ – ПК-10 на Красноярской ТЭЦ-1, ПК-38 на Красноярской ГРЭС-2 и Назаровской ГРЭС, создававшиеся с учетом имевшегося тогда опыта сжигания подмосковного бурого угля, по условиям загрязнения поверхностей нагрева могли работать только с ограниченной до 60...70 % паропроизводительностью, а полную нагрузку могли нести не более одной недели с последующей остановкой на чистку, продолжавшуюся 5...10 дней при трехсменной работе [2, 3].

Надежная работа котлов лимитировалась шлакованием радиационных поверхностей нагрева и образованием связанных на основе сульфата кальция прочных отложений на радиационно-конвективных и конвективных поверхностях. Изучение условий протекания этих процессов и опытные сжигания назаровского угля в циклонной топке на Кузнецкой ТЭЦ привели к предложению сжигать КАУ при высоких температурах в топке [4], которое затем получило более обстоятельное обоснование в работах проф. И.К. Лебедева с сотрудниками как метод высокотемпературной обработки золы. Реализация этого метода была связана со сжиганием углей в режиме жидкого шлакоудаления (ЖШУ).



**Рис. 1.** Схема компоновки котла ПК-38: 1) топочная камера; 2) ширмовый пароперегреватель высокого давления; 3) ширмовый пароперегреватель низкого давления; 4) конвективный пароперегреватель высокого давления; 5) переходная зона; 6) конвективный пароперегреватель низкого давления; 7 и 9) ступени воздухоподогревателя; 8) водяной экономайзер; 10) горелка

Основной эффект по улучшению работоспособности и тепловой эффективности

поверхностей нагрева достигался за счет улавливания более легкоплавкой золы в топке и связывания кальция в составе золы уноса в соединения, которые менее активно образуют сульфатно-связанные отложения. Реконструкция котлов ПК-38 и ПК-10 с переводом на работу в режиме жидкого шлакоудаления позволила улучшить их эксплуатационные возможности.

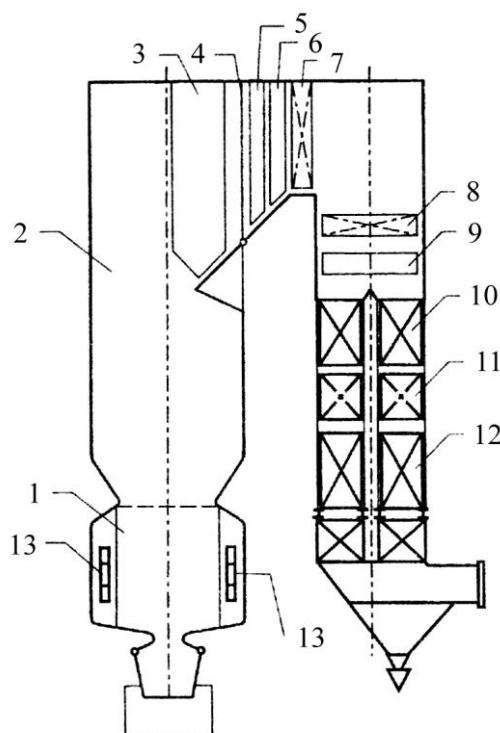
Реконструированная модификация котлов ПК-38-3 (Назаровской ГРЭС) (рис. 1) отличается от проектного исполнения только переводом на жидкое шлакоудаление. Топка представляет собой открытую призматическую камеру. Система пылеприготовления – замкнутая, с прямым вдуванием пыли посредством четырех эжекционных тонкоструйных горелок, расположенных на фронтальной стене. Слияние горелочных струй образует S-образный прямооточный факел. Охлаждаемый слабонаклонный под вместе с примыкающей утепленной частью экранов создает зону шлакообразования. В горизонтальном газоходе расположены ширмовые ступени первичного и вторичного пароперегревателя, в опускном газоходе – конвективные пакеты первичного и вторичного перегревателя, переходная зона, водяной экономайзер и две ступени воздухоподогревателя.

Двухлетние наблюдения за эвакуацией шлака из-под котлов Назаровской ГРЭС [5] показали, что более половины случаев ограничения нагрузки открытых топок по условиям ЖШУ вызваны образованием шлака, который не тонет в воде, заполняющей устройство грануляции и механизированного шлакоудаления, и по этой причине известен под названием «плавающий шлак». Сложности ликвидации последствий его образования обусловлены не только частотой случаев, но главным образом тем, что даже кратковременное появление плавающего шлака может инициировать другие нарушения и приводить к тяжелым последствиям. Схема развития этого процесса выглядит следующим образом.

Образовавшийся нетонущий шлак распределяется по поверхности воды в гидрозатворе устройства шлакоудаления и остается вне зоны досягаемости шнекового механизма. Дальнейший выход плавающего шлака постепенно приводит к накоплению в гидрозатворе значительных по объему нетонущих образований. В результате этого даже в случае нормализации вытекающего из летки шлака с приобретением свойств хорошей потопляемости при грануляции, он не может контактировать с водой и поэтому не гранулируется, а накапливаясь поверх плавающего шлака, медленно охлаждается. Если не происходит соприкосновения остывающего шлака со стенками шлаковой шахты, то утяжеляющаяся глыба может опускаться вниз и заклинить шнековый винт. Гораздо чаще развитие шлакового нарыва на кусках плавающего шлака переходит на стенки шлаковой шахты и приводит к постепенной зашлаковке летки. Последствия усложняются тем, что образующаяся при медленном охлаждении кристаллическая структура монолита обладает высокой прочностью и создает немалые трудности при расшлаковке.

Наиболее удачным воплощением основных положений метода высокотемпературной обработки золы оказались котлоагрегаты БКЗ-320-140 ПТ (рис. 2), оборудованные полуразомкнутой системой пылеприготовления с газовой сушкой и полукрытой топкой с ЖШУ. Загрязнения поверхностей нагрева не лимитировали их работу на углях Назаровского и Ирша-Бородинского месторождений, то есть находились в состоянии, которое определяется как эксплуатационно-чистое [6]. Топочные экраны не подвержены интенсивному шлакованию, а на конвективных элементах образуются лишь так называемые первичные отложения, на которых в других условиях сжигания развиваются вторичные гребневидные отложения.

Топочная камера всех модификаций котлов БКЗ-320-140 ПТ – полукрытого типа с пережимом, образованным фронтальными и задними экранами, который разделяет ее на камеру горения и камеру охлаждения (рис. 2). Камера горения состоит из двух восьмигранных предтопок, экранированных ошипованными трубами и соединенных коридором. Восемь прямооточных горелок установлены на четырех угловых гранях каждого предтопка по тангенциальной схеме, создавая вихревое движение факела с встречным вращением потоков в обоих предтопках.



**Рис. 2.** Схема компоновки котла БКЗ-320-140 ПТ: 1) камера горения; 2) камера охлаждения; 3) ширмовый пароперегреватель; 4) отводящие трубы заднего экрана; 5–7) конвективные ступени пароперегревателя; 8 и 11) ступени водяного экономайзера; 9) окно газозаборной шахты; 10 и 12) ступени воздухоподогревателя; 13) горелки

Котлы БКЗ-320-140 ПТ 5 в заводском исполнении оборудованы четырьмя пылесистемами с молотковыми мельницами и инерционными сепараторами пыли, с полуразомкнутой схемой по сушильному агенту, который сбрасывается в сбросные горелки, установленные выше основных, под пережимом. Единственным исключением из всех котлов этого типа, действующих в энергетике, является котел БКЗ-320-140 ПТ 4 (Иркутской ТЭЦ-6, ст. № 5), имеющий разомкнутую систему пылеприготовления со сбросом сушильного агента в тракт дымовых газов за котлом.

Камера охлаждения в виде прямоугольной призмы расположена над пережимом и образована гладкотрубными экранами из труб  $\varnothing 60$  мм. Горизонтальный потолок топки занимает потолочный РПП. Радиационно-конвективный пароперегреватель выполнен по типовой для котлов БКЗ схеме: первая ступень – потолочные трубы и конвективный противоточный пакет вертикальных змеевиков; вторая ступень – вертикальные ширмы на выходе из топки; третья ступень – змеевиковые пакеты в горизонтальном конвективном газоходе, расположенные за отводящими трубами заднего экрана; четвертая ступень – змеевиковый пакет, расположенный в горизонтальном газоходе между первой и третьей ступенями.

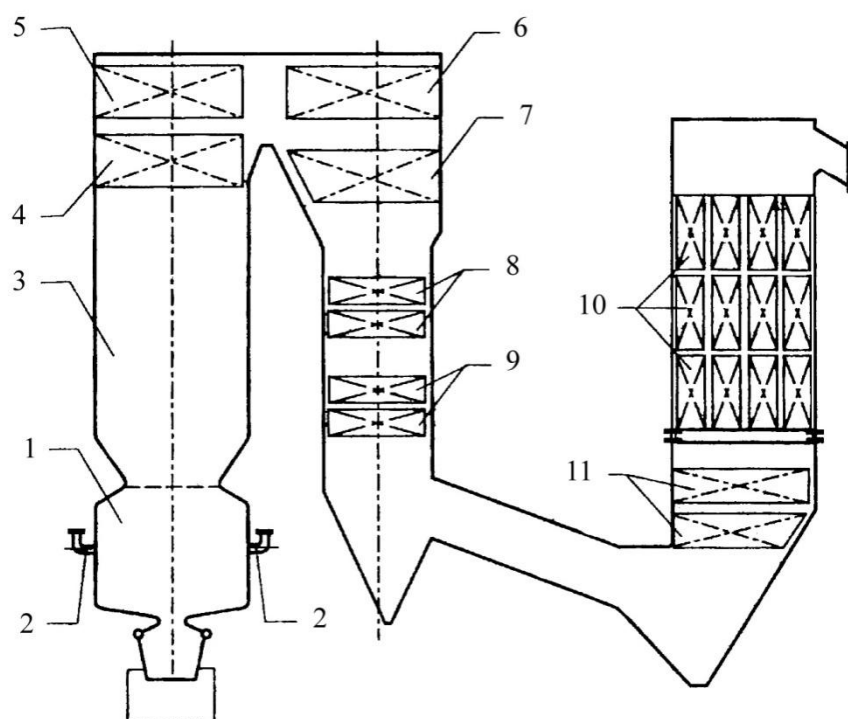
Перенос полученного опыта на конструирование новых котлоагрегатов не обеспечивал последовательное позитивное развитие высокотемпературного сжигания. Представляется, что главная причина состояла в том, что метод высокотемпературной обработки золы тогда и до сих пор упрощенно отождествляется с одним из его признаков – жидким шлакоудалением.

Одним из примеров этому является котел П-49 блока 500 МВт, оснащенный полуоткрытой топкой с встречной компоновкой горелок и с разомкнутой системой пылеприготовления. Интенсивное шлакование и сульфатные связанные отложения ширмовых поверхностей нагрева являлись следствием затянутого в камеру охлаждения горения, так как температура на выходе из топки оказалась слишком высока по условиям шлакования, а в затянутом факеле слишком мала для связывания оксида кальция [7].

Прямоточный котел П-49 (Назаровской ГРЭС) с промежуточным перегревом пара состоял из двух независимых по топливно-газовому тракту корпусов с ЖШУ и работал на сушонке назаровского угля, подаваемой из центральной системы пылеприготовления (пылезавода) горячим воздухом под давлением.

Топка каждого корпуса (рис. 3) представляла собой полукруглый призматический объем с двухсторонним пережимом (фронтального и заднего экранов), отделяющим камеру охлаждения от ошипованной камеры горения с одноярусным расположением прямоточных горелок встречно по восемь на фронтальной и задней стенах.

В верхней части топки находятся горизонтальные защитные ширмы и два пакета ширм первичного пароперегревателя I, II, III ступени. В поворотной камере размещены горизонтальные ширмы первичного пароперегревателя IV, V ступеней. В опускном газоходе установлены пакеты ширм вторичного пароперегревателя III, II, I ступени. Водяной экономайзер и трубчатый воздухоподогреватель вынесены в отдельный газоход с восходящим движением дымовых газов.



**Рис. 3.** Схема компоновки котла П-49 (корпус А): 1) камера горения; 2) горелки; 3) камера охлаждения; 4) ширмы I и II ступеней; 5) ширмы II и III ступеней; 6) ширмы IV и V ступеней; 7, 8, 9) ширмы вторичного пароперегревателя III, II и I ступеней; 10) воздухоподогреватель; 11) водяной экономайзер

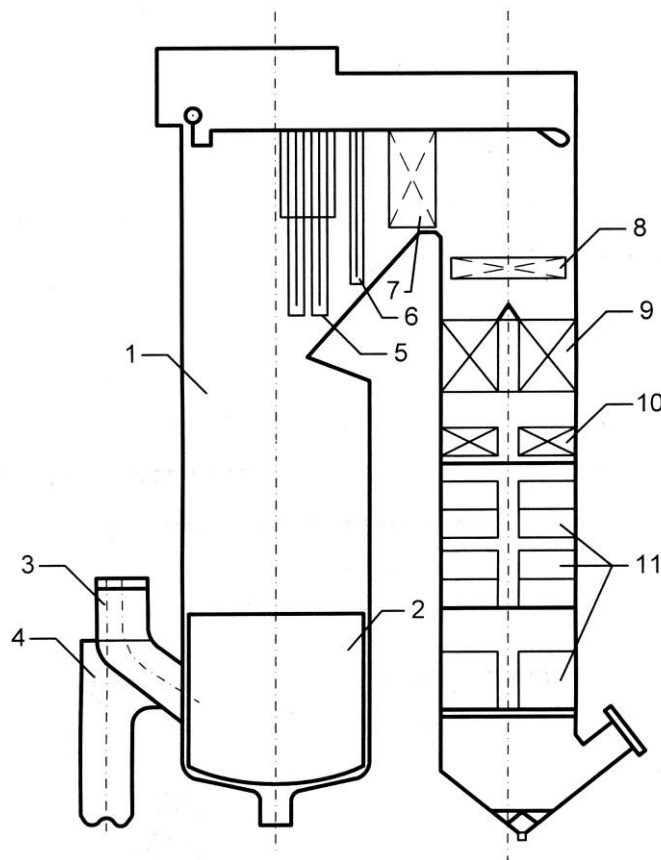
Почти столь же эффективным, как для их прототипа – котла БКЗ-320-140-ПТ, получилось применение восьмигранных предтопков при сжигании бурых углей в котлах БКЗ-420-140-ПТ и БКЗ-640-140-ПТ [8], что подчеркивало важную роль аэродинамики топочного устройства. Это в полной мере подтверждено освоением котлов БКЗ-220-100 ЖШ, в открытой топке которых за счет прямоточно-вихревой аэродинамической структуры факела создавались условия сжигания назаровского угля, которые не лимитировали работу котлов по условиям золового загрязнения теплопринимающих поверхностей [9].

Котел БКЗ-220-100 ЖШ (ТЭЦ Юргинского машиностроительного завода, ст. № 4, 5) разработан АО «Сибэнергомаш» как поисковый вариант оптимальной конструкции котла с открытой топкой для сжигания назаровского угля (рис. 4).



Топочная камера представляет собой открытую призму, в нижней части которой трубами фронтального и заднего экранов образован слабонаклонный симметричный под. Нижняя часть топки высотой 5575 мм для создания зоны шлакообразования ошипована и покрыта хромитовой массой.

Котел оснащен системой пылеприготовления с прямым вдуванием пыли, состоящей из четырех молотковых мельниц, установленных по фронту с разворотом к продольной оси котла на  $15^\circ$  для крайних и на  $7^\circ$  для средних. Угольная пыль через гравитационные сепараторы подается сушильным агентом в плоскоструйные горелочные устройства МЭИ.



**Рис. 4.** Схема компоновки котла БКЗ-220-100 ЖШ: 1) топочная камера; 2) ошипованная зона; 3) сопло вторичного воздуха; 4) гравитационный сепаратор шахтной мельницы; 5) топочные ширмы; 6) выходная ступень ширмового пароперегревателя; 7) конвективная ступень пароперегревателя; 8 и 10) ступени водяного экономайзера; 9 и 11) ступени воздухоподогревателя

Горелки выполнены в виде вертикальных щелей прямоугольного сечения с центральным расположением сопла вторичного воздуха и обеспечивают подачу аэросмеси и эжектирующего вторичного воздуха под углом  $30^\circ$  к горизонту.

За счет взаимной ориентации горелок и стен приподовой зоны в нижней части топки создается своеобразное взаимодействие плоских струй, приводящее к возникновению в зоне активного горения горизонтальной вихревой структуры факела, получившей название «аэрошатровой».

Пароперегреватель выполнен четырехступенчатым, при этом первая ступень змеевиковая, а остальные изготовлены в виде ширм. Конвективная шахта выполнена по бесприсосной схеме с двухступенчатой компоновкой низкотемпературных поверхностей нагрева.

Наряду с феноменальным результатом по достижению эксплуатационно-чистого состояния поверхностей нагрева в этом котле наблюдались специфические затруднения с удалением шлака. При конструктивных несовершенствах и при работе в неотлаженном режиме в

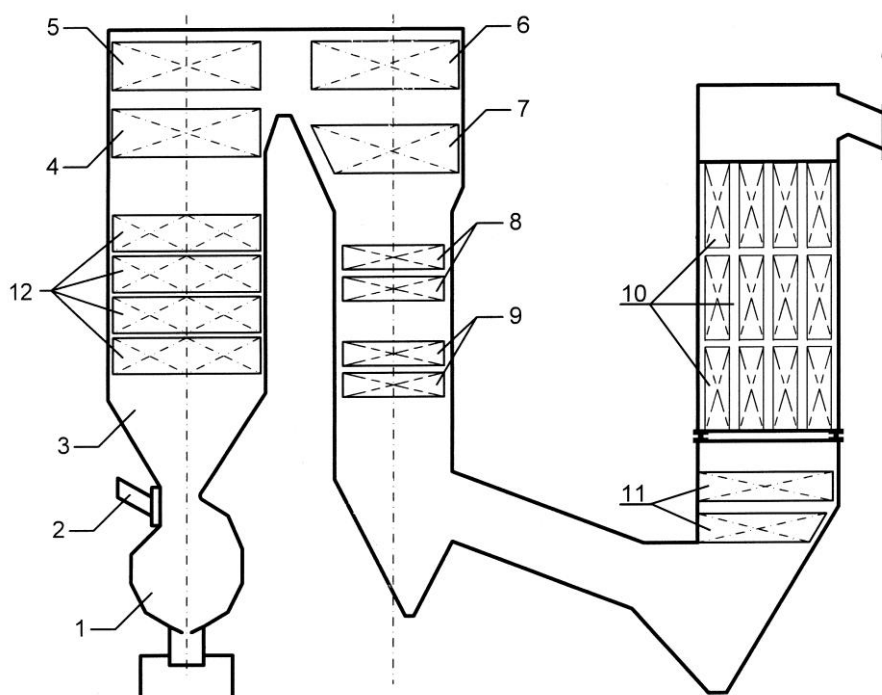
слое шлака на поду топки создаются условия для восстановления железа из оксидов, находящихся в составе расплава. Железо из-за большей плотности оседает вниз и с течением времени под шлаковым расплавом на поду топки образуется слой металла. Металлизация пода создает опасность как для нормальной эксплуатации котла, так и для обслуживающего персонала, поскольку при вытекании расплавленного металла в водяной объем устройства для гранулирования шлака образуется водород и создается угроза создания взрывоопасной концентрации. Кроме того, пребывание расплавленного железа на поду топки приводит к ускорению трещинообразования в обмуровке и к вытеканию металла, а затем и шлака помимо летки.

На заднем скате пода топки происходило накопление металлического железа настолько интенсивно, что через 500...800 ч на поду оказывалось до 10...15 т металла, и котел вынужденно останавливался. Аварийный останов производился при первом же появлении струй расплава железа в шлаке на выходе из летки. В противном случае вытекание большой массы металла в шлаковую ванну приводило к заклиниванию шнека и поломке шлаковой дробилки, либо создавало угрозу взрыва шлакоприемного устройства.

Толщина слоя железа на поду составляла до 200...300 мм, а занимаемая им площадь порядка 20...25 м<sup>2</sup>. В отличие от случаев, известных из публикаций, в данном случае слой металла не контактировал с зашпигованными трубами пода, а располагался на слое шлака. Тем не менее процесс разделки металлического монолита на малоразмерные блоки с последующим их удалением из топки превращался в трудоемкую и многозатратную операцию, длившуюся в среднем 8 дней.

Целенаправленные исследования позволили обосновать мероприятия по реконструкции, основным содержанием которых были изменения аэродинамики топки за счет конструкции, ориентации, компоновки, режимов работы горелочных устройств, а также изменения свойств угольной пыли. Результатом реконструкции и наладки котла стала полная ликвидация накопления металлического железа в зоне шлакообразования, что, однако, несколько ухудшило состояние конвективных поверхностей нагрева по золовому загрязнению.

Новое конструктивное воплощение высокотемпературного сжигания было осуществлено при внедрении вихревой топки [10] в составе опытно-промышленного котла ТПЕ-427. Этому предшествовала реконструкция одного из корпусов котла П-49 Назаровской ГРЭС с заменой проектного исполнения экранов камерой горения (рис. 5).



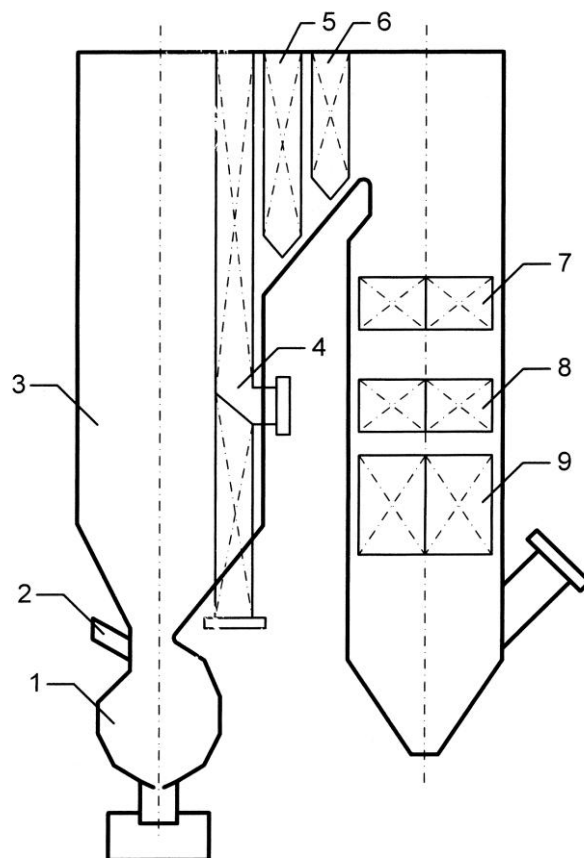
**Рис. 5.** Схема компоновки котла П-49 (корпус Б): 1) камера горения; 2) горелки; 3) камера охлаждения; 4) ширмы I и II ступеней; 5) ширмы II и III ступеней; 6) ширмы IV и V ступеней;

7–9) ширмы вторичного пароперегревателя III, II, I ступеней; 10) воздухоподогреватель; 11) водяной экономайзер; 12) двухсветные экраны НРЧ и СРЧ

Камера горения с условным диаметром 6,2 м выполнена из цельносварных газоплотных панелей, ошпирована и покрыта карборундовой обмазкой. Внутренний объем камеры разделен на четыре отсека тремя двухсветными экранами, продолжающимися в диффузорной части камеры охлаждения и в средней радиационной части. В каждом отсеке с фронта под пережимом установлены две прямоточные горелки, оси которых наклонены под углом 15°. За счет такой ориентации горелок и скорости истечения вторичного воздуха в диапазоне от 70 до 110 м/с струи вписываются в конфигурацию камеры горения, образуя вихревое движение потока с горизонтальной осью вращения. Расчетные значения скорости истечения первичного и вторичного воздуха составляют при номинальной нагрузке соответственно 40 и 80 м/с.

Двухсветные экраны из камеры горения корпуса Б продолжены в камеру охлаждения в пределах диффузора и средней радиационной части, а для их очистки дополнительно к имеющимся на котле установлены четыре глубоководных аппарата водяной обмывки. Последующие по газовому тракту поверхности нагрева обоих корпусов остались неизменными, за исключением увеличения поверхности по одному из потоков водяного экономайзера в корпусе Б.

Котел ТПЕ-427 (Новосибирской ТЭЦ-3) был оборудован двухкамерной топкой с ЖШУ, камера горения которой выполнена в виде вихревого предтопка с условным диаметром 4,4 м, разделенного по ширине на три отсека с двумя прямоточными горелками в каждом из них (рис. 6).



**Рис. 6.** Схема компоновки котла ТПЕ-427: 1) камера горения; 2) горелки; 3) камера охлаждения; 4) топочные ширмы; 5 и 6) ширмовый пароперегреватель I и II ступеней; 7 и 8) конвективный пароперегреватель II и I ступеней; 9) двухступенчатый водяной экономайзер

Горелочные струи благодаря конфигурации камеры горения и ориентации горелок создают интенсивное вихревое движение с горизонтальной осью вихря.



Котел оснащен четырьмя нитками разомкнутой системы пылеприготовления с молотковыми мельницами и с газовой сушкой при отборе дымовых газов из газохода за водяным экономайзером и сбросе отработанного сушильного агента после двухступенчатой очистки через мокрые скрубберы в газовый тракт перед дымососом. Угольная пыль транспортируется к горелкам высококонцентрированным потоком за счет разрежения, создаваемого паровыми эжекторами.

Поверхности нагрева котла состоят из: пароперегревательных ширм, вертикально расположенных в камере охлаждения вдоль заднего экрана; ширм пароперегревателя I и II ступени в горизонтальном газоходе; КПП II и I ступени, мембранного водяного экономайзера в опускном газоходе; рекуперативного воздухоподогревателя, вынесенного в отдельный газоход. В дополнение к ним при ремонте в опускном газоходе на выходе дымовых газов был установлен гладкотрубный пакет водяного экономайзера.

По результатам доводочно-наладочных исследований, надежная эксплуатация котлов с горизонтальным вихревым предтопком ограничена по условиям шлакования, в меньшей мере при сжигании назаровского и ирша-бородинского углей и в большей мере при сжигании березовского угля. В последнем случае усиливается сульфатизация золовых отложений на выходе газов в конвективные элементы пароперегревателя.

В середине 70-х гг. прошлого столетия на передний план среди научно-технических задач в энергетике вышла проблема сокращения выбросов оксидов азота в атмосферу. Это совпало с началом освоения одного из крупнейших месторождений КАУ – Березовского, что в совокупности предопределило снижение интереса к развитию конструкций котлов с высокотемпературными процессами сжигания и соответственно стимулировало разработку надежных котлов с пониженным уровнем температур в топке. С позиции подавления генерации оксидов азота в топке это позволяло уменьшить образование термических или воздушных оксидов, что представлялось тогда наиболее действенным путем. С другой стороны, исследования керновых проб березовского угля показали, что значительная часть залегающего топлива представлена углем с низкой зольностью ( $A^d = 4,5 \dots 5,0 \%$ ), с содержанием  $CaO$  в золе до 60 %, с температурой жидкоплавкого состояния золы  $t_c$  на уровне 1650...1700 °С, что заставляло сомневаться в возможности сжигания такого угля в топках с ЖШУ [11]. В дальнейшем, по мере накопления опыта работы с альтернативными топочными устройствами все более укреплялось мнение о неперспективности топок ЖШУ не только для сжигания березовского, но и других КАУ.

Надо отметить, что примеры достижения приемлемой надежности работы поверхностей нагрева при сжигании КАУ в режиме твердого шлакоудаления (ТШУ) известны с 60-х гг. Представителем этой ветви реконструированных котлоагрегатов является котел ПК-10ш, установленный на Красноярской ТЭЦ-1, который оборудован однокамерной открытой топкой с ТШУ.

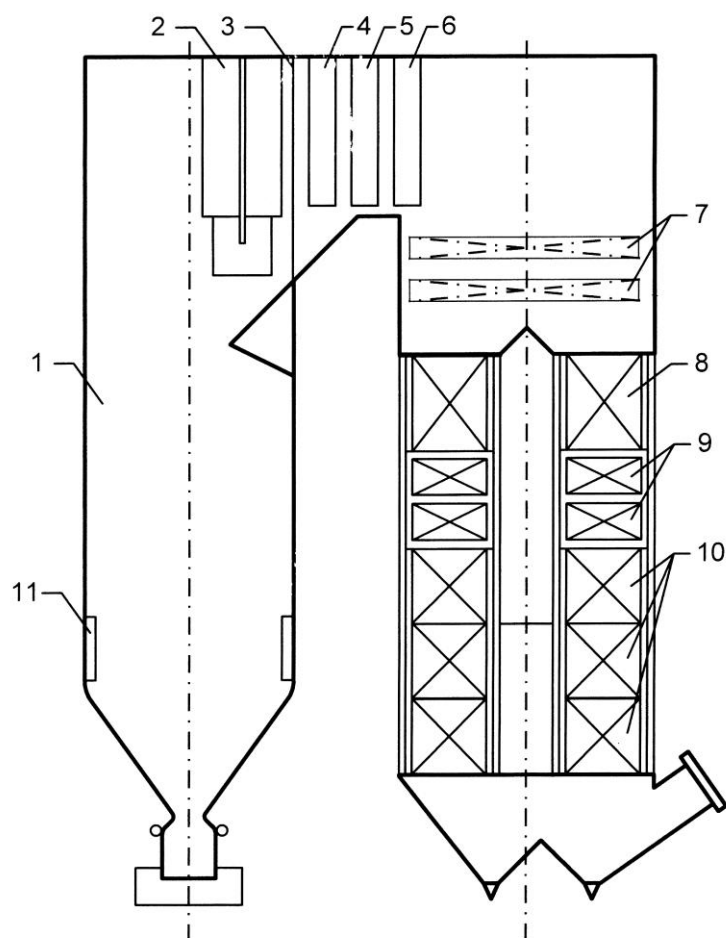
Прототипом для проверки конструктивных решений при проектировании головного котла для энергоблока 800 МВт на березовском угле послужил котел БКЗ-210-140 Ф (Владивостокской ТЭЦ-2). Этот котел оснащен однокамерной призматической топкой сечением в свету 7808×7424 мм открытого типа с ТШУ (рис. 7).

Боковые экраны топки выполнены из труб  $\varnothing 60$  мм с шагом 64 мм. Установлены четыре пылесистемы замкнутого типа с мельницами-вентиляторами и инерционными сепараторами; сушильным агентом являются дымовые газы из верхней части топки с регулированием температуры рециркуляцией дымовых газов после дымососа. Прямоточные горелки расположены по углам топки в один ярус и ориентированы по касательной к условной окружности диаметром 0,9 м в центре топки, что создает вертикально закрученный вихревой факел в зоне активного горения. Радиационно-конвективный пароперегреватель выполнен по типовой для котлов БКЗ четырехступенчатой схеме, с вынесенной в топку второй ступенью (ширмы). Двухступенчатый водяной экономайзер и воздухоподогреватель расположены «в рассечку» в опускном конвективном газоходе.

С учетом накопленного опыта сжигания КАУ и предварительных исследований березовского угля при создании нового поколения котлов с ТШУ закладывались решения,

направленные на предотвращение шлакования и образования сульфатно-вязких отложений. Основными из них являются: низкие температуры в зоне активного горения при газовой сушке топлива и с рециркуляцией дымовых газов в топку; пониженное тепловое напряжение в топке и температура газов на выходе из нее; тангенциальная многоярусная компоновка прямооточных горелок; увеличенные шаги труб в конвективных поверхностях нагрева; мероприятия по повышению эффективности очистки. Созданные на этих положениях самый крупный отечественный котел на бурых углях П-67 и его ближайший аналог – котел Е-500 по результатам наладки и испытаний, а также опыта длительной эксплуатации признаются оправдавшими исходные предпосылки. Низкотемпературное сжигание с высокой долей рециркуляции «холодных» газов, обеспечивавшее снижение величины и неравномерности тепловых нагрузок топочных экранов, приводит к уменьшению общей интенсивности роста отложений.

И все же условия сжигания в этих котлах благоприятствуют образованию на радиационных поверхностях нагрева особого типа отложений, обогащенных железом, которые представляют затруднения для имеющихся на сегодня в распоряжении средств комплексной очистки. По этой причине для дальнейшего совершенствования технологии сжигания КАУ в подобных котлах рекомендуется принимать при расчетах топочной камеры коэффициент тепловой эффективности экранов равным 0,35 вместо 0,45 и увеличить количество средств очистки поверхностей нагрева в топке. Рекомендуемое значение тепловой эффективности является в настоящее время нормативным. Однако из опыта эксплуатации и исследований котла П-67 известно, что уровень стабилизации отложений (в неочищаемых зонах) наступает при настолько большой их толщине, что тепловая эффективность топки находится на уровне 0,2...0,25.



**Рис. 7.** Схема компоновки котла БКЗ-210-140 Ф: 1) топочная камера; 2) ширмовый пароперегреватель; 3) отводящие трубы заднего экрана; 4–6) ступени пароперегревателя; 7 и 9) ступени водяного экономайзера; 8 и 10) ступени воздухоподогревателя; 11) горелки

По-видимому, нужно констатировать, что при сжигании березовского угля не оправдались предположения о незначительности загрязнения экранов только за счет уменьшения падающих тепловых потоков в зоне активного горения тангенциальных топок. Более того, у непосредственных исследователей есть основания заключать, что «попытки создать безшлаковочный пылеугольный котел для березовского угля не увенчались успехом» [12].

Тем не менее поиски в этом направлении продолжаются. Современным и лучшим на сегодня воплощением развития достоинств тангенциальных топок с вихревым вертикальным движением пылеугольного факела является экспериментальный котел БКЗ-820-140, запущенный в 1997 г. на Новоиркутской ТЭЦ [13].

Принципиальные особенности топочного процесса в этом котле обеспечиваются оригинальной конструкцией топки, представляющей собой открытую восьмигранную призматическую камеру, внутри которой по всей высоте расположена коаксиальная восьмигранная вставка. Внешняя и внутренняя восьмигранные поверхности представляют собой радиационные экраны, выполненные в виде цельносварных панелей из труб  $\varnothing 60$  мм с шагом 80 мм таким образом, что поперечные размеры (диаметры условно вписанных окружностей) составляют соответственно 18540 и 9270 мм. Благодаря этому топочное пространство имеет кольцевое сечение с размером 4635 мм, которое дало наименование всему конструктивному типу – кольцевые топки.

В своей нижней части наружные экраны отгибаются внутрь и образуют восьмискатную холодную воронку. Вверху топки выполнены два симметричных отвода газов в конвективные газоходы с наклонным нижним подом, где размещены полурадиационная и конвективные ступени пароперегревателя. Радиационную часть пароперегревателя составляют трубы потолка топки, потолка, стен и пода поворотных газоходов, а также настенных панелей, размещенных на двух фронтальных и двух тыльных стенах в верхней части внешней поверхности топки.

Расчетная температура газов на выходе из топки  $984^{\circ}\text{C}$ , а за конвективным пароперегревателем –  $662^{\circ}\text{C}$ . Водяной экономайзер установлен в опускных газоходах котла четырьмя пакетами с шахматным расположением труб  $\varnothing 32$  мм с поперечным шагом 100 мм. Трубчатый воздухоподогреватель установлен в вынесенной из-под котла колонке в виде отдельных кубов, включенных по шестипоточной схеме в четыре яруса по высоте.

Технологическая схема пылесжигания базируется на шести индивидуальных системах пылеприготовления с прямым вдуванием, каждая из которых оборудована мельницей-вентилятором МВ 2700/650/590 с сушкой смесью дымовых газов, забираемых из поворотной камеры и из напорного газохода основных дымососов, при температуре аэросмеси за мельницей  $130^{\circ}\text{C}$ . На напорном тракте пылесистемы перед горелочным блоком предусмотрен делитель пыли, позволяющий перераспределять угольную пыль между верхним и нижним ярусами. Каждая мельница соединяется по тракту аэросмеси со своим блоком горелок, состоящим из трех ярусов. На шести наружных гранях топки размещены горелочные блоки, а на двух остальных противоположных гранях установлены только сопла вторичного воздуха.

Положение факела в кольцевом пространстве топки изменяется с помощью регулируемых горелок, позволяющих смещать направление горелочной струи относительно внутреннего и внешнего экранов за счет перераспределения потоков вторичного воздуха. На наружных стенах топки под аэродинамическим выступом расположены сопла для подачи в верх топки низкотемпературных рециркулирующих газов, струи которых вводятся по тангенциальной схеме противоположно вращению факела. Кроме сглаживания остаточной крутки продуктов сгорания, ускорения смешивания, влияния на выравнивание температуры пара в радиационных настенных панелях, эти струи создают настильную завесу для экранов, что может иметь влияние на условия осаждения на трубах продуктов преобразования МЧ топлива.

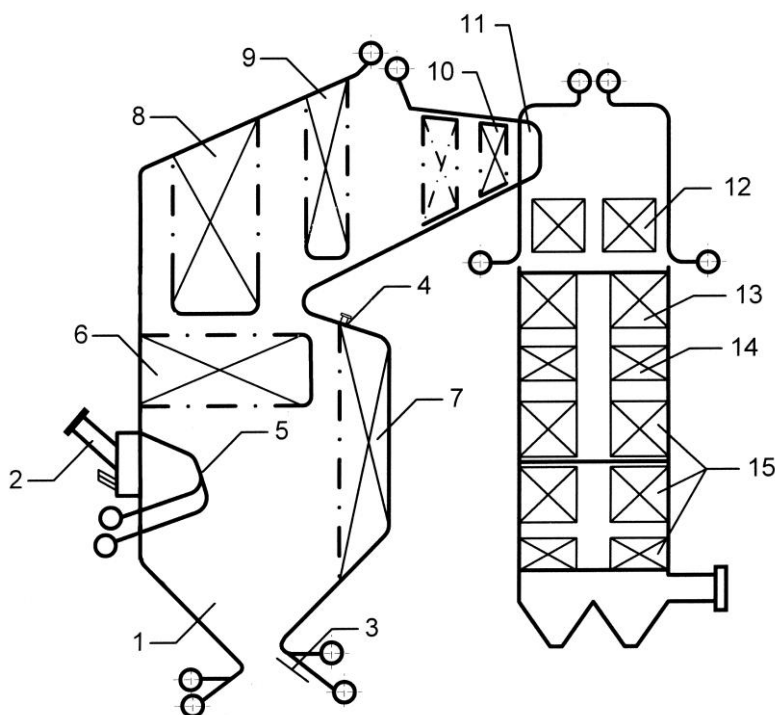
Режимно-наладочные и балансовые испытания котла, а затем эксплуатационные наблюдения показали, что проектные показатели обеспечиваются при сжигании азейского и ирша-бородинского углей, а также их смеси. После 1900 ч наработки котла без применения средств очистки не было обнаружено заметного загрязнения и шлакования экранов и пароперегревателя.

Перспектива использования кольцевых топок на других низкосортных углях и в котлах большей мощности связана с проведением серии комплексных испытаний котла БКЗ-820-140 в различных условиях. Технические решения по профилю котлов для крупных энергоблоков на КАУ показывают существенные преимущества кольцевой топки для ТЭС по габаритным, весовым, стоимостным и ряду эксплуатационных показателей по сравнению с вариантом котла П-67. Технологическими факторами, позволяющими исключить образование прочносвязанных золовых отложений на экранах топки, считаются низкий уровень температуры газов в ядре факела, умеренные теплонапряжения и применение специальных регулируемых горелок.

Модификации тангенциальной вихревой организации факела разработаны для реконструкции котлов с ЖШУ при переводе на режим ТШУ (двухвихревая и четырехвихревая топки), в которой низкотемпературное сжигание осуществляется по схеме прямого вдувания с газовой сушкой угля при многоярусном расположении горелок и подаче в топку рециркулирующих газов.

По иному, чем при обычном пылеугольном сжигании, проявляются свойства МЧ КАУ в котлах с низкотемпературным вихревым сжиганием немолотого угля, где за счет активной аэродинамики в объеме топки с локальными очагами шлакования и сульфатизированных отложений результативно конкурирует абразивный износ [14].

Котел БКЗ-420-140-9 (Усть-Илимской ТЭЦ, ст. № 6) является головным образцом, реализующим сжигание немолотого (мелкодробленого) угля в топке с низкотемпературным вихревым факелом по схеме ЛПИ (рис. 8).



**Рис. 8.** Схема компоновки котла БКЗ-420-140-9: 1) топочная камера; 2) горелки; 3) сопла нижнего дутья; 4) сопла третичного дутья; 5) газоотбойный элемент; 6) горизонтальный радиационный пароперегреватель; 7) испарительные двусветные панели и вертикальный радиационный пароперегреватель; 8 и 9) ступени ширмового пароперегревателя; 10) ступени

конвективного пароперегревателя; 11) фестон; 12 и 14) ступени водяного экономайзера; 13 и 15) ступени воздухоподогревателя

Газоплотная топочная камера прямоугольного сечения имеет на фронтальной стене восемь прямооточных горелок, расположенных в один ряд с углом наклона  $45^\circ$ . В устье холодной воронки по всей ширине топки в два яруса расположены сопла нижнего дутья. В средней части топки по нижней плоскости аэродинамического выступа заднего экрана расположены сопла третичного дутья. Еще одной особенностью этой топки является наличие газоотбойных элементов, роль которых играют надгорелочный козырек, выполненный из труб фронтального экрана, и задняя плоскость горизонтального радиационного пароперегревателя вместе с нижней плоскостью аэродинамического выступа и прилегающей к нему частью заднего экрана.

Котел оборудован четырьмя независимыми системами подачи топлива, каждая из которых включает в себя бункер сырого угля, шнековый питатель сырого угля и систему трубопроводов для эжекторной подачи топлива в топку.

За счет распределения вторичного воздуха между горелочным и нижним (через сопла холодной воронки) дутьем, а при открытом шибере – с участием третичного дутья, а также за счет внутритопочных отклоняющих элементов достигается разделение факела на несколько вихревых зон с горизонтальной осью вращения. Частицы топлива по мере выгорания в нижней, наиболее загруженной, вихревой зоне перемещаются в верхнюю, где завершается их горение. Благодаря такой аэродинамике получается более размытое ядро горения, выравниваются температуры и падающие тепловые потоки по высоте топочной камеры.

Этому способствует размещение вдоль заднего экрана и перпендикулярно к нему испарительных ширм, которых в исходном варианте было восемь, а при реконструкции было сокращено до четырех. Для уменьшения износа экранов топки и потерь топлива с провалом при реконструкции в устье холодной воронки был смонтирован воздушно-каскадный классификатор.

Пароперегреватель состоит из радиационных и конвективных ступеней. В топке расположены шесть вертикальных ширм, установленных вместо четырех испарительных при реконструкции с шагом 1200 мм. В центральной части топки размещены две горизонтальные ширмы высотой 2160 мм с коллекторами на фронте котла. На выходе из топки размещены две ступени ширмового пароперегревателя, а в горизонтальном газоходе – два пакета конвективного пароперегревателя. Кроме этого пароперегревательными поверхностями являются экраны боковых стен горизонтального газохода, потолка, фронтальной и задней стен конвективной шахты.

В двухпоточной конвективной шахте расположены двухступенчатые водяной экономайзер и трубчатый воздухоподогреватель.

Подобный принцип аэродинамической схемы топочного процесса, создающий заполнение холодной воронки вихрем с горизонтальной осью вращения за счет распределения вторичного воздуха между горелками с фронта котла и соплами нижнего и заднего дутья, названный ступенчато-вихревой топкой, используется для реконструкции котлов, оборудованных пылесистемой прямого вдувания с фронтальным расположением мельниц и горелок.

Ближайшие разработки по технологии сжигания КАУ, кроме совершенствования аэродинамики топочного процесса, связаны с так называемой «предфакельной» тепловой обработкой угля, разные варианты которой направлены на частичную или полную газификацию горючей массы до наступления воспламенения. Это в числе прочих преимуществ обеспечивает значительное уменьшение выхода топливных оксидов азота при сжигании высокорекреационных углей.

К таким технологиям относятся вариации многоступенчатого сжигания, использование предгорелочного высокотемпературного подогрева угольной пыли, газификация угля под слоем шлакового расплава, барботируемого парокислородным дутьем. При существенных различиях этих технологий по температурному уровню этапов газификации общей их особенностью является то, что свойства минеральной составляющей формируются в восстановительной среде.

Вышеприведенные фрагменты хронологии котлостроительной практики для углей КАБ



не претендуют на какую-либо полноту анализа технологических решений. Тем не менее они позволяют констатировать, что минеральная часть КАУ отличается многовариантностью проявления свойств в условиях сжигания. Факты свидетельствуют о том, что даже исходя из представлений о топочном процессе как средстве целенаправленного воздействия на образующиеся золу и шлак и владея на каком-то этапе необходимыми знаниями, достигаемый результат нередко оказывался лишь приблизительным.

Это обстоятельство двигало одну из главных тенденций преодоления натрубных загрязнений – оснащение котлов средствами очистки, которая развивалась в самостоятельное направление техники. Арсенал средств очистки в современных котлах для сжигания КАУ состоит из многочисленных и разнообразных аппаратов и представляет собой комплексную систему, эффективность которой в немалой мере зависит от свойств натрубных отложений.

Правомерен и такой вывод: в процессе эволюции котельной техники факторам топочного процесса отводилась определяющая роль в воздействии на минеральные продукты сжигания КАУ. При этом наряду с температурным уровнем все большее значение приобретает аэродинамика зоны горения и топки в целом, а также наличие специально создаваемых областей с глубоким обеднением топочной среды кислородом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Янковский А.Б., Мастепанов А.М., Бушуев В.В. и др. Основные положения «Энергетической стратегии России на период до 2020 г.» // Теплоэнергетика. – 2002. – № 1. – С. 2–8.
2. Бондарев А.И. Опыт сжигания назаровских углей в топках котлов ПК-38 Назаровской ГРЭС // Матер. научно-техн. совещ. по повышению технического уровня сжигания канско-ачинских углей. – Красноярск: Изд-во ЦНТИ, 1963. – С. 19–24.
3. Иванников В.М. Анализ работы котлоагрегатов, установленных на Красноярской ТЭЦ-1 // Матер. научно-техн. совещ. по экономическому сжиганию бурых углей Канско-Ачинского бассейна. – Красноярск: Изд-во «Красноярский рабочий», 1967. – С. 191–198.
4. Лебедев И.К. Особенности сжигания углей Канско-Ачинского бассейна в топках энергетических котельных агрегатов большой мощности: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, 1971. – 43 с.
5. Лебедев И.К., Заворин А.С., Сарапулов Г.А., Шнайдер В.К. Особенности жидкого шлака из-под котлов ПК-38 Назаровской ГРЭС // Энергетик. – 1975. – № 8. – С. 25–27.
6. Рубин М.М., Эглист С.Н., Зоричев В.Д. и др. Результаты освоения головной серии котлов БКЗ-320-140 ПТ с полукотлами на ирша-бородинском буром угле // Теплоэнергетика. – 1968. – № 11. – С. 2–6.
7. Шехтер Г.Я., Чернышева Л.Ф., Пугач Л.И., Освоение котла П-49 блока 500 МВт Назаровской ГРЭС // Вопросы сжигания канско-ачинских углей в мощных парогенераторах: Тез. докл. Всес. совещ. – Красноярск, 1973. – С. 13–23.
8. Пугач Л.И., Серант Ф.А., Волобуев и др. Освоение головных и опытно-промышленных котельных установок при сжигании углей сибирских месторождений // Электрические станции. – 1995. – № 11. – С. 3–11.
9. Федецкий И.И. Исследование процессов в минеральной части назаровского угля в топке с плоскими параллельными струями: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1981. – 23 с.
10. Голованов Н.В., Митор В.В. Освоение и исследование головных малогабаритных парогенераторов с вихревой топкой ЦКТИ // Труды ЦКТИ. – 1975. – Вып. 132. – С. 24–26.
11. Кузнецов Н.В., Маршак Ю.Л., Дик Э.П. Основные направления развития паровых котлов для канско-ачинских и экибастузских углей // Теплоэнергетика. – 1981. – № 5. – С. 7–13.
12. Васильев В.В. Шлакование, загрязнение и очистка поверхностей нагрева котлов Е-500 и П-67 // Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях: Матер. Всерос. научно-практ. конф. – Красноярск, 2000. – С. 203–212.

13. Серант Ф.А. Разработка и исследование кольцевой топки, её промышленное внедрение и испытания на котле паропроизводительностью 820 т/ч: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1999. – 58 с.
14. Рундыгин Ю.А. Шестаков С.М., Усик Б.В. и др. Освоение и исследование котла БКЗ-420-140-9 с вихревой топкой ЛПИ // Теплоэнергетика. – 1988. – № 1. – С. 12-16.

Поступила 07.11.2011 г.